На правах рукописи

Суховеева Ольга Эдуардовна

ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПОТОКОВ CO_2 В АГРОЛАНДШАФТАХ ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

25.00.23 – Физическая география и биогеография,
география почв и геохимия ландшафтов

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в лаборатории антропогенных изменений климатической системы (ЛАИКС) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института географии Российской академии наук

Научный руководитель	**Карелин Дмитрий Витальевич** доктор биологических наук, профессор, профессор кафедры общей экологии Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова
Официальные оппоненты	**Черкашин Александр Константинович** доктор географических наук, профессор, заведующий лабораторией теоретической географии Института географии имени В.Б. Сочавы СО РАН, г. Иркутск
	Припутина Ирина Владимировна кандидат географических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории моделирования экосистем Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, г. Пущино
Ведущая организация	**Вычислительный центр имени А.А. Дородницына РАН** Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» РАН, г. Москва

Защита диссертации состоится 21 декабря 2018 г. в 13:30 на заседании диссертационного совета Д 002.046.03 при ФГБУН Институте географии РАН по адресу: 119017, г. Москва, Старомонетный пер., д. 29.

Телефон +7 495 959-00-32, e-mail: d00204603@igras.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института географии РАН: http://igras.ru/1758.

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба присылать ученому секретарю диссертационного совета Д 002.046.03 по указанному адресу.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат географических наук Белоновская Е.А. Белоновская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Диоксид углерода, или углекислый газ (CO_2), является ведущим биогенным химическим агентом, участвующим в круговороте углерода (С), а также одним из важнейших парниковых газов (IPCC, 2014). Он попадает в атмосферу из природных источников – через дыхание автотрофных и гетеротрофных организмов, газообмен между воздухом и океаном, а также от антропогенных выбросов, преимущественно вследствие сжигания ископаемого топлива, обезлесения, пожаров и землепользования (Смирнов, 2016; The global carbon project, 2017). Замена естественных ландшафтов на агроландшафты через землепользование является одним из мощнейших путей по силе и скорости воздействия человека на геосистемы и затрагивает геохимические процессы в почве и атмосфере, поскольку часть природных стоков и источников CO_2 переводится в антропогенные, величину изменения которых предстоит оценить.

Одним из главных путей поступления CO_2 в атмосферу является эмиссия из почв, или почвенное дыхание, формируемое дыханием корней и микробным разложением органического вещества почвы, отмерших растительных остатков и органических веществ, продуцируемых вегетирующими корнями (Bond-Lamberty, Tompson, 2010; Kuzyakov, 2006; Luo, Zhou, 2006; Raich et al., 2002; Степанов 2011). Сумма почвенного и надземного дыхания характеризует валовое дыхание экосистемы, которое совместно с фотосинтезом формирует нетто-баланс CO_2 в экосистеме, или чистый экосистемный обмен углерода (Net Ecosystem Exchange) (Мониторинг потоков, 2017; Чебакова, 2014).

В науках о Земле длительное время с успехом используются методы математического моделирования, которое заменяет собой эксперименты, там, где они невозможны, и прямые измерения, там, где они затруднены, а также служит альтернативой многолетнему мониторингу в различных почвенно-климатических условиях. В связи с необходимостью разработки стратегии снижения эмиссии вследствие сельскохозяйственного землепользования возникает потребность в создании единого подхода, позволяющего учитывать зависимость потоков CO_2 от комплекса природных и антропогенных факторов на региональном уровне.

В «Национальном кадастре антропогенных выбросов…» учитывается только антропогенная эмиссия, причем поток парниковых газов от пахотных почв разделяется на два сектора: сектор «Землепользования, изменения землепользования и лесного хозяйства» (где представлены показатели прямой эмиссии CO_2 и CH_4 из почв) и сектор «Сельского хозяйства» (где учитывается эмиссия CO_2 от вкладов известкования и внесения мочевины, выбросы N_2O из почв и CH_4 от рисоводства и использования органических удобрений). Для определения динамики CO_2 в наземных экосистемах в глобальном масштабе применяется балансовый подход

(Houghton, 2007; Le Quere et al., 2013), при интегрировании потоков CO_2 для пахотных почв России – картографический метод в виде наложения друг на друга различных типов карт (Пулы и потоки, 2007; Smith et al., 2007). Также широко используются регрессионные зависимости эмиссии CO_2 от гидротермических и почвенно-климатических параметров среды (Наумов, 2009; Смагин и др., 2010; Chen et al., 2014). При современных быстрых климатических изменениях возрастает значение имитационного моделирования, поскольку формируются новые погодные условия, которые не встречались за прошедшие периоды инструментальных измерений, используемых для построения моделей других типов, что приводит к ошибкам при экстраполяции данных (Мониторинг потоков, 2017).

DNDC (DeNitrification-DeComposition) – процессно-ориентированная имитационная модель, созданная для оценки динамики основных компонентов биогеохимических циклов углерода и азота, в том числе биогенных парниковых газов, в почвах сельскохозяйственного назначения (Li et al., 1992a).

Использование DNDC для оценки эмиссии парниковых газов от сельского хозяйства рекомендуется РКИК ООН (Рамочной конвенцией ООН по изменению климата) в качестве альтернативы методикам МГЭИК (Межгосударственной группы экспертов по изменению климата) (Estimation of emissions from agriculture, 2004; Report of the 38th meeting, 2012), а также допускается методикой EX-ACT, разработанной ФАО (Продовольственной и сельскохозяйственной организацией ООН) (User friendly manual, 2013). Фактически она является единственной имитационной моделью, которая применяется для инвентаризации парниковых газов на государственном уровне и участвует в подготовке национальных отчетов в Великобритании и КНР.

Степень разработанности темы. Модель DNDC была апробирована в различных географических регионах и для разных вариантов землепользования в 14 странах мира (Bolan et al., 2004). Она показала хорошие результаты при моделировании эмиссии парниковых газов в Азии (Frolking et al., 2004; Zhuang et al., 2004; Pathak et al., 2005; Li et al., 2005b; Qiu et al., 2005), США (Li et al., 1994; Li, 2008), Канаде (Dutta et al., 2016; Yadav, Wang, 2017; Guest et al., 2017) и Австралии (Chen et al., 2013). DNDC применялась в европейских проектах CAPRI (Leip et al., 2008), NOFRETETE и NitroEurope (Giltrap et al., 2010) по оценке цикла азота в пахотных почвах, а также в международной программной инициативе по сельскому хозяйству, продовольственной безопасности и изменению климата (FACCE-JPI projects booklet, 2017), была рекомендована для оценки эмиссии парниковых газов на уровне хозяйств и поиска возможностей ее снижения (Rosenstock et al., 2016). В последние годы были предприняты попытки использовать модель в России для анализа эмиссии закиси азота из почвы, занятой овощными культурами (Бучкина и др., 2007; Balashov et al., 2010, 2014) и эмиссии CO_2 из верховых болот (Kurbatova et al., 2009), но

до настоящего времени она еще не была апробирована для оценки потоков CO_2 в агроландшафтах.

Цель исследования – оценить динамику потоков CO_2 и сравнить влияние на них внешних условий в различных по почвенно-климатическим условиям и типам землепользования агроландшафтах на основе имитационного и статистического моделирования. Достижение поставленной цели связано с выполнением следующих **задач**:

1. Адаптировать модель DNDC для условий России и верифицировать ее по данным полевых измерений;

2. Сравнить эффективность имитационного и статистического моделирования при анализе потоков CO_2;

3. Оценить влияние внешних условий и факторов на потоки CO_2 в агроландшафтах на Европейской территории России;

4. Проанализировать пространственно-временную динамику потоков CO_2 в различных типах агроландшафтов Европейской части страны.

Поскольку наиболее распространенными типами агроландшафтов являются пашни (Агроэкологическая оценка земель, 2005), они и были выбраны в качестве **объектов** исследования. **Предметом** его являлись основные потоки CO_2 в наземных ландшафтах – эмиссия из почвы, или почвенное дыхание, и баланс в экосистеме, или чистый экосистемный обмен.

Новизна: 1. Разработана стратегия применения имитационной модели DNDC для оценки потоков CO_2 в агроландшафтах на территории России, в том числе скорректированы ее внутренние настройки и параметры в соответствии с условиями страны; 2. Разработан набор из пяти критериев, позволяющий оценить эффективность моделирования и достоверность полученных результатов; 3. Создана комплексная методика оценки влияния внешних факторов на потоки CO_2, в том числе метод шести вариантов агроландшафтов, включающих в себя различные антропогенные факторы по мере усложнения их воздействия на почвенные процессы; 4. Дан прогноз увеличения абсолютных значений потоков CO_2 в агроландшафтах в ответ на повышение его атмосферной концентрации, приводящего к формированию нулевого баланса органического углерода в пахотных почвах Европейской территории России; 5. На основе изменений природных и антропогенных факторов географической среды рассчитана динамика дыхания почвы, чистого экосистемного обмена и органического углерода в почве в областях Центрального Нечерноземья за 1990-2017 гг.

Вклад автора: 1. Созданы базы данных климатических условий Российского Нечерноземья, а также характеристик почвенного и растительного покрова полевых агроландшафтов; 2. Подготовлена информационная основа для корректировки внутренних настроек модели DNDC с целью ее адаптации и верификации для пахотных почв России; 3. Проведен расчет потоков CO_2 и оценена эффективность моделирования при различных

почвенно-климатических условиях и типах землепользования на основе статистического и имитационного подходов.

Теоретическая значимость. Работа создает методологическую основу для понимания причин формирования потоков CO_2 вследствие сельскохозяйственного землепользования и разработки возможных путей их изменения.

Практическая значимость. Разработанная методика оценки потоков CO_2 будет способствовать оптимизации используемых принципов их инвентаризации на территории России, усовершенствованию региональных и глобальных моделей биогеохимического цикла углерода и учета влияния на него климатических изменений. Полученные результаты могут служить основой для организации и планирования производственной деятельности в сельском хозяйстве, направленной на уменьшение антропогенной нагрузки на геосистемы, в том числе на снижение эмиссии парниковых газов в результате землепользования.

Работа выполнена в рамках темы фундаментальных научных исследований 0148-2014-0005 № 01201352499 «Решение фундаментальных проблем анализа и прогноза состояния климатической системы Земли» и Программы Президиума РАН № 51 «Изменение климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования».

Методология и методы исследования. Работа носит расчетно-аналитический характер. Применяется имитационное моделирование и статистический подход, также используются сравнительный и литературно-картографический методы.

Положения, выносимые на защиту:

1. Антропогенные воздействия на агроландшафты закономерно повторяются, поэтому геохимические процессы в них могут быть оценены на основе математических моделей с использованием местных данных;

2. Разработанная методика применения модели DNDC на территории России для анализа и прогноза потоков CO_2 в агроландшафтах позволяет с большей точностью оценить их величину, чем регрессионные зависимости от температурно-влажностных параметров;

3. В пахотных агроландшафтах основной зоны сельскохозяйственного использования земель Европейской территории России антропогенные факторы оказывают определяющее влияние на динамику формирования потоков CO_2, в отличие от гидротермических условий среды, действие которых оказывается вторичным.

Степень достоверности полученных результатов: Достоверность обеспечивается глубиной исследования основных концепций отечественных и зарубежных ученых по вопросам изучаемой проблемы. Измерения в трех полевых опытах, являющихся основой для верификации модели, проводились квалифицированными исследователями с помощью современного высокотехнологичного оборудования. Результативность созданной методики применения DNDC

в России оценивалась на базе разработанного набора из пяти критериев, позволяющих оценить эффективность моделирования. Сформулированные научные положения, выводы и рекомендации полностью соответствуют содержанию диссертации и хорошо согласуются с существующими представлениями об особенностях динамики потоков CO_2 в агроландшафтах.

Публикации. По результатам исследования опубликованы 25 печатных работ, из них 5 статей в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ для публикации результатов диссертационных работ, 3 статьи в рецензируемых журналах из базы РИНЦ, 16 тезисов научных конференций и 1 база данных.

Апробация. Основные результаты исследования были представлены на конференциях: *зарубежных*: 5th and 6th International symposiums on soil organic matter (Gottingen, Germany, 2015; Harpenden, United Kingdom, 2017), 21st World congress of soil science "Soil science: beyond food and fuel" (Rio-de-Janeiro, Brazil, 2018); *международных*: «Geography, culture and society for our future Earth» (Москва, 2015), «Anthropogenic evolution of modern soils and food production under changing of soil and climatic conditions» (Орел, 2015), «Вклад молодых ученых в инновационное развитие АПК России» (Пенза, 2015), XIX и XX «Докучаевские молодежные чтения» (Санкт-Петербург, 2016-2017), XXIII и XXIV «Ломоносов» (Москва, 2016-2017), «Современная экология: образование, наука, практика» (Воронеж, 2017), к 100-летию Института географии РАН «География и вызовы XXI века» (Москва, 2018); *всероссийских*: 4й «Грани науки» (Казань, 2015), «Математика, информатика, естествознание в экономике и общества» (Москва, 2016), Памяти профессора А.С. Комарова (Пущино, 2016), 5й «Математическое моделирование в экологии» (Пущино, 2017), «Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Основные результаты и пути развития» (Москва, 2017).

Структура и объем диссертации. Работа изложена на 209 страницах машинописного текста, содержит 34 таблицы и 44 рисунка; состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка литературы, включающего 484 источника, в том числе 242 на иностранном языке.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность и искреннюю сердечную благодарность научному руководителю Карелину Д.В. за всестороннюю помощь при выполнении диссертационного исследования. Автор благодарит сотрудников Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН Курганову И.Н., Лопеса де Гереню В.О., Благодатского С.А., начальника отдела международных связей Самаркандского государственного университета Насырова М.Г. за предоставленные данные и обсуждение работы; директора Института глобального климата и экологии Росгидромета и РАН Романовскую А.А., заведующего кафедрой агрохимии Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова Романенкова В.А., заведующего отделом географии и эволюции почв Института

географии РАН Горячкина С.В. за научные консультации, а также участников международной сети DNDC Network и ее координатора Донну Гилтрап (Donna Giltrap) за информационную поддержку.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Биогеохимический цикл углерода в агроландшафтах

Проблема парниковых газов подробно освещается в официальных документах (IPCC, 1990, 2007, 2014; Бюллетень ВМО, 2016, 2017) и научных работах (Задорожний и др., 2010; Романовская, 2008, 2014; Степанов, 2011). Широко представлен анализ эмиссии CO_2 из почвы, или почвенного дыхания, и ее составляющих (Chen et al., 2014; Dolman et al., 2012; Hanson et al., 2000; Moyano et al., 2013; Shvidenko et al., 2010; Евдокимов и др., 2010; Заварзин, Кудеяров, 2006; Карелин и др., 2014, 2017; Кузяков, Ларионова, 2006; Курганова, 2010; Наумов, 2004; Пулы и потоки, 2007; Сапронов, 2008). Многократно оценивалось содержание органического углерода ($C_{орг}$) в почвах мира (Batjes, 2016; Greenland, 1995; Jenkinson et al., 1991; Köchy et al., 2015; Puhe, Ulrich, 2012; Shangguan et al., 2014; The global carbon cycle, 2003) и России (Kolchugina et al., 1995; Nilsson et al., 2000; Геннадиев и др., 2010; Исмагилова, 2010; Семенов, Тулина, 2011; Щепащенко и др., 2013), а процессы преобразования углерода в пахотных почвах были всесторонне описаны (Abohassan, 2004; Lal, 2004; Shimmel, 1987; Авксентьев, 2011; Безуглова, Юдина, 2006; Гедгафова и др., 2015; Гончарова, Телеснина, 2010; Зинякова, 2014; Ларионова и др., 2009, 2010; Милановский и др., 2015; Наумов, 2009; Семенов и др., 2008, 2009). Моделирование биогеохимического цикла углерода в последние годы интенсивно развивается (Cox et al., 2001; Chertov et al., 2017; Davidson et al., 2006; Eliseev, Mokhov, 2007; Gerber et al., 2010; Golubyatnikov, Svirezhev, 2008; Grant, Pattey, 2003; Jain et al., 2009; Komarov et al., 2003; Li, 2000; McGuire et al., 2001; Sokolov et al., 2008; Thornton et al., 2007; Tonitto et al., 2006; Wania et al., 2012; Xu, Prentice, 2008; Zaehle, Friend, 2010; Zavalishin, 2008; Базилевич, Титлянова, 2008; Благодатский, 2011; Володин, 2007; Мохов и др., 2006; Припутина и др., 2016; Тарко, 2005; Шанин и др., 2010).

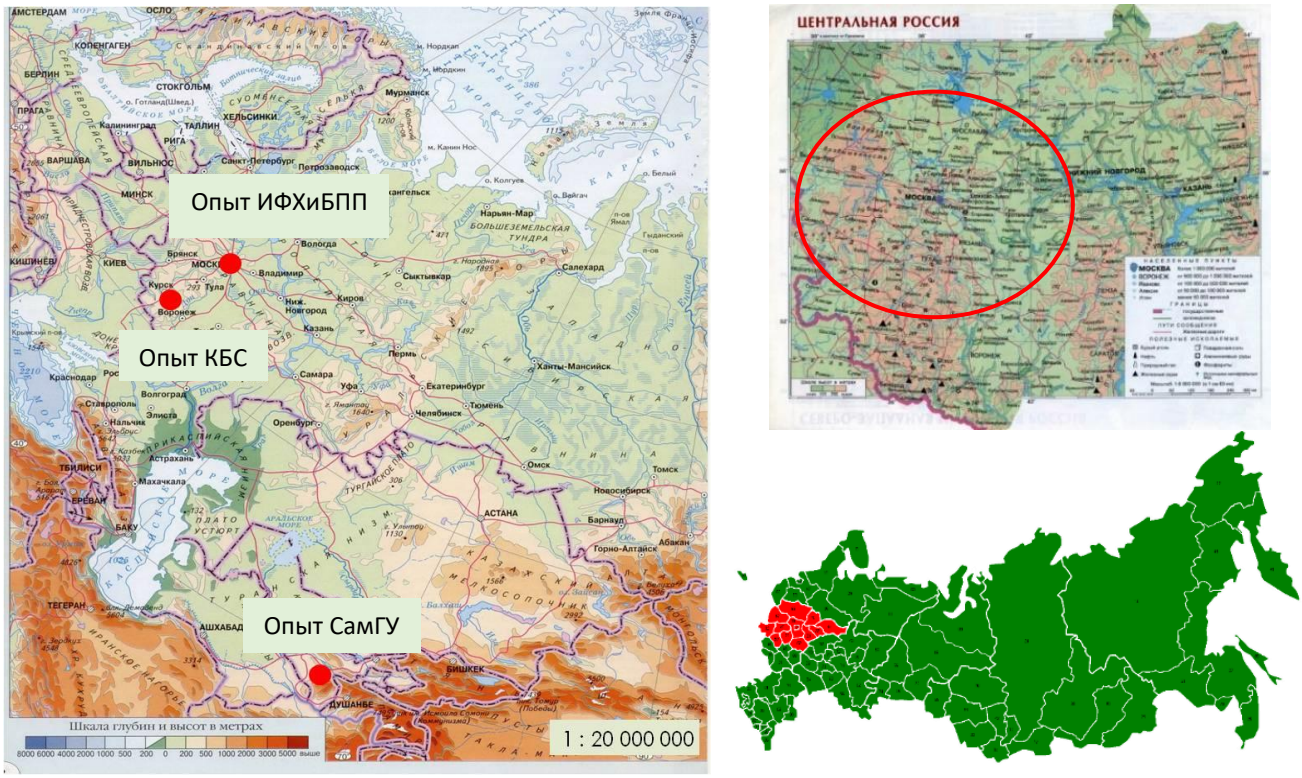
Глава 2. Материалы и методы исследования

Была использована версия DNDC 9.5 (User's guide, 2012). Концептуальная схема моделирования представлена на рисунке 1.

Оценка эффективности моделирования проводилась на примере трех полевых опытов, расположенных в различных по почвенным и климатическим условиям географических регионах, в которых измерялись потоки CO_2 и гидротермические параметры среды (табл. 1). Эксперименты по оценке дыхания почвы находятся на Европейской части страны; для верификации динамики

чистого экосистемного обмена был взят опыт, расположенный в Узбекистане, поскольку в России измерения такого рода не выполнялись (рис. 2а).

Рисунок 1. Схема модели DNDC, актуальная для настоящего исследования



а) Полевые опыты – основа для верификации модели

б) Центральное Нечерноземье – регион для применения модели

Рисунок 2. Территории, используемые в исследовании для моделирования с помощью DNDC

Модельные эксперименты по оценке потоков CO_2 в агроландшафтах проводились для Центрального Нечерноземья, как одного из ключевых сельскохозяйственных районов России. Регион выделяется на основе преобладающего типа дерново-подзолистых почв, он расположен в бореальных и суббореальных областях в зоне смешанных и лиственных лесов, характеризуется

равнинным рельефом, умеренно континентальным климатом и включает в себя 12 областей (рис. 2б). Сведения о почвенно-климатических условиях и особенностях сельскохозяйственного производства были взяты из данных официальной статистики и литературных источников в соответствии с разработанной автором методикой (табл. 10).

Таблица 1. Характеристика полевых опытов, по данным которых проводилась верификация модели DNDC

Поток CO_2	Дыхание почвы		Чистый экосистемный обмен
Название опыта	Курская биосферная станция Института географии РАН (КБС ИГ РАН)	Полевая опытная станция Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН (ИФХиБПП РАН)	Учебное хозяйство Самаркандского государственного университета (СамГУ)
Местоположение	Россия, Курская обл., Медвенский р-н, с. Панино	Россия, Московская обл., Серпуховской р-н, г. Пущино	Узбекистан, Самаркандская обл., Пахтачийский р-н, г. Карнаб
Географические координаты	51°54’с.ш., 36°10’в.д.	54°49’с.ш., 37°34’в.д.	39°40’с.ш., 65°46’в.д.
Природная зона	Лесостепь	Смешанные леса	Полупустыня
Тип агроландшафта	Пашня	Пашня	Пастбище
Кем предоставлены данные	Карелин Д.В.	Курганова И.Н.	Насыров М.Г.
Метод измерения	Камерный	Камерный	Градиентный микрометеорологический
Годы измерений	2017, апрель-октябрь	1997-2009, круглогодично	1998-2001, март-октябрь
Частота измерений	1 раз в 10-15 дней	1 раз в 7-10 дней	Ежедневно
Измерительные приборы	Портативные инфракрасные газоанализаторы AZ 7752 (AZ instruments, Taiwan) и LI-8100A (Li-Cor, Nebraska, USA)	Газовые хроматографы «Chrom-5», ЧССР, «Кристалл-2000», (Россия)	Установка Bowen Ratio Energy Balance System (Model 023/CO_2 Bowen ratio system, Campbell Scientific Inc. (CSI), Logan, UT, USA)
Переменные, измеряемые одновременно с целевым показателем	Температура воздуха, температура почвы, влажность почвы	Температура воздуха, температура почвы, влажность почвы	Солнечная радиация, фотосинтетически активная радиация, эвапотранспирация, осадки, влажность почвы, относительная влажность воздуха, поток тепла от почвы, теплообмен, температура воздуха
Растительный покров	Озимая пшеница, ячмень, картофель, подсолнечник	Озимая пшеница и чистый пар	Полынь раскидистая, эфемеры
Тип почвы по классификации Почвенного института им. В.В. Докучаева	Чернозем выщелоченный	Серая лесная обычная окультуренная	Серо-бурая гипсоносная
Тип почвы, World Reference Base for Soil Resources	Haplic Chernozem	Luvic Phaeozems	Calcic Gypsisols
Гранулометрический состав	Тяжелосуглинистый	Среднесуглинистый	Тяжелосуглинистый
Метеоданные	Метеостанция г. Курск (ВНИИ ГМИ – МЦД)	Станция комплексного фонового мониторинга Приокско-Террасного биосферного заповедника	Метеостанция г. Самарканд (ВНИИ ГМИ – МЦД)

Оценка влияния характеристик почвенного покрова и метеорологических условий на потоки CO_2 проводилась на примере картофеля за два смежных года – 2011 г. и 2012 г. с контрастным увлажнением. Моделирование влияния содержания $C_{орг}$ в почве выполнялось на примере озимой пшеницы для различных типов почвы, без удобрений. Воздействие биологических особенностей культур оценивалась на основе разделения растений на группы по производственному принципу и назначению (Посыпанов и др., 2007). Для проверки влияния элементов сельскохозяйственной практики на потоки CO_2 были разработаны шесть вариантов агроландшафтов, включающих в себя различные антропогенные факторы по мере усложнения их воздействия на почвенные процессы. Отклик потоков CO_2 на ежегодное повышение его концентрации в атмосфере на 3 ppm (WMO GGB, 2017) был составлен на 25 лет. При оценке динамики потоков CO_2 в Центральном Нечерноземье вводились ограничения: наличие метеоданных в свободном доступе за 1990-2017 гг.; преобладающий тип почвы занимает не менее 30% территории области; непрерывный ряд возделывания культуры не менее 10 лет; доля культуры в структуре посевных площадей не менее 5%.

Для оценки связей потоков CO_2 с метеорологическими параметрами применялись методы описательной статистики, корреляционный, регрессионный (Камышова и др., 2012) и факторный (StatSoft, 2012) методы анализа. Использовались пакеты программ IBM SPSS Statistics 20, StatSoft Statistica 10 и Microsoft Excel 2013. Для проверки эффективности моделирования использовался набор из пяти критериев: коэффициент Нэша-Сатклиффа (E_m, диапазон значений $(-\infty;1]$, модель эффективна при $E_m > 0$) (Nash, Sutcliffe, 1970), коэффициент Тэйла (T, диапазон значений [0;1], модель эффективна при $T \leq 0{,}30$) (Тэйл, 1977), коэффициент корреляции Пирсона (r_p, уровень значимости $P < 0{,}05$), однофакторный дисперсионный анализ, двухвыборочный F-тест дисперсий (средние значения и дисперсии равны, если $F < F_{крит}$ и $P > 0{,}05$), а также графический метод.

Глава 3. Географические особенности потоков CO_2 в агроландшафтах и оценка эффективности их моделирования на основе DNDC

Верификация DNDC на основе литературных данных (табл. 2) по эмиссии CO_2 и балансу C в пахотных почвах Московской, Владимирской и Орловской областей показала, что модель дает качественные оценки потоков CO_2 в агроландшафтах Европейской территории страны и может использоваться для анализа и прогноза составляющих биогеохимического цикла C в почвах сельскохозяйственного назначения на территории России. Во всех примерах средние полевые величины находились внутри диапазона возможных значений по модели, хотя пики эмиссии в летнее время она занижала. DNDC позволяет компенсировать недостаток исходных данных за счет встроенных функций, а также разделить составляющие цикла C: корневое и микробное дыхание, дыхание растений и фотосинтез.

Таблица 2. Сопоставление данных моделирования, полученных с помощью DNDC в данном исследовании, с результатами полевых измерений по литературным данным для Центрального Нечерноземья

Параметры	Модель	Полевые данные					
		Полевая оценка	Культуры	Регион	Период, гг.	Почва	Ссылка
Годовой баланс С в почве, кг С $га^{-1}$ $год^{-1}$	162,6-277,7	250	Севооборот озимая пшеница – чистый пар	Пущино, Опытная станция ИФХиБПП РАН	2000-2004	Серая лесная тяжелосуглинистая	Сапронов, 2008
Эмиссия CO_2 из почвы, кг С $га^{-1}$ $год^{-1}$	2258-3664	3304					
Эмиссия CO_2 из почвы, кг С $га^{-1}$ $год^{-1}$	7420-8196	7850	Озимая пшеница	Орловская обл., запад	2013	Серая лесная	Карелин и др., 2017
Годовой баланс С в почве, кг С $га^{-1}$ $год^{-1}$ – Без удобрений – С удобрениями	-247,6…-558,0 +4987,9...+6111,0	-1004 +6016	Картофель	Владимирская обл., Длительный стационарный опыт ВНИИОУ	2004-2014	Дерново-подзолистая супесчаная, глееватая	Лукин, 2015
Эмиссия CO_2 из почвы, кг С $га^{-1}$ $год^{-1}$ – Без удобрений – С удобрениями	427-800 1307-4074	1753 3019					
Эмиссия CO_2 из почвы, г $м^{-2}$ $ч^{-1}$	0,008-0,029	0,009-0,035	Бессменный чистый пар	Москва, Длительный полевой опыт ТСХА	2005-2008	Дерново-подзолистая легкосуглинистая	Чистотин, Сафонов, 2016
	0,076-0,088	0,043-0,113	Бессменный ячмень				
	0,068-0,245	Максимум ~ 0,600	Овес	Московская обл., УОПЭЦ «Чашниково»	Май-июль 2009	Дерново-подзолистая суглинистая	Гончарова, Телеснина, 2010
	0,075-0,175	0,054-0,324	Картофель	Москва, Центр точного земледелия, РГАУ-МСХА	Январь-август 2015	Дерново-подзолистая	Мазиров и др., 2015
Соотношение корневого и микробного дыхания	$\frac{0,33}{0,67}$	$\frac{0,34-0,38}{0,62-0,66}$	Озимая пшеница	Пущино, Опытная станция ИФХиБПП	–	Серая лесная тяжелосуглинистая	Курганова, 2010
Отношение дыхания к фотосинтезу	0,34-0,36	0,35-0,60	Озимая пшеница	Лабораторный опыт	–	--	Gifford, 1995

В опыте КБС для дыхания выщелоченного чернозема под ячменем, подсолнечником и картофелем отмечались средние корреляции на уровне r_p = 0,52-0,57, P < 0,05 с температурой почвы, но не с ее влажностью (табл. 3). Для озимой пшеницы значимых корреляций и регрессий с гидротермическими параметрами среды получено не было. В опыте ИФХиБПП РАН дыхание серых лесных почв зависело от термического режима почвы и воздуха на уровне r_p = 0,47-0,60, P < 0,001 в зернопаровом севообороте и в посевах пшеницы (табл. 4). Влияние влажности почвы на ее дыхание проявлялось только в годы возделывания пшеницы, причем связь между этими параметрами была обратной. В опыте СамГУ для чистого экосистемного обмена полынных пастбищ были получены слабые положительные корреляции с режимом тепла r_p = 0,24-0,33, P < 0,001, и отрицательные – с влажностными характеристиками среды r_p = –0,21- –0,33, P < 0,001 (табл. 5).

Таблица 3. Зависимость эмиссии CO_2 из почвы от ее температуры в Опыте КБС

Показатели	Культуры			
	Ячмень	Подсолнечник	Картофель	
Температура почвы на глубине	5 см	5 см	5 см	10 см
Коэффициенты корреляции Пирсона, r_p	0,522	0,518	0,552	0,568
P	0,031	0,040	0,026	0,022

Таблица 4. Коэффициенты корреляции Пирсона между эмиссией CO_2 из почвы и гидротермическими характеристиками в Опыте ИФХиБПП РАН

Переменные	Севооборот	Пар	Пшеница
Температура воздуха	r_p = 0,465 P < 0,001	незначим	r_p = 0,540 P < 0,001
Температура почвы на глубине 5 см	r_p = 0,507 P < 0,001	r_p = 0,239 P = 0,010	r_p = 0,595 P < 0,001
Влажность почвы	незначим	незначим	r_p = -0,203 P = 0,002

Таблица 5. Связи между нетто-балансом CO_2 и метеорологическими переменными в Опыте СамГУ

Параметры	Температура воздуха	Поток тепла от почвы	Эвапотранспирация	Сумма осадков	Влажность почвы	Влажность воздуха
Коэффициенты корреляции Пирсона, r_p	0,327	0,242	-0,207	-0,230	-0,263	-0,327
P	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001

Согласно полученным регрессионным зависимостям потоков CO_2 от погодно-климатических условий и коэффициентам детерминации (табл. 6), дыхание пахотного выщелоченного чернозема в течение вегетационного периода на 27-32% определяется температурой почвы; динамика эмиссии CO_2 из серой лесной почвы на 31-41% зависит от ее температуры и влажности; температура воздуха и осадки определяют не более 16% дисперсии нетто-потока CO_2 полупустынных пастбищ.

Таблица 6. Регрессионные зависимости потоков CO_2 в агроландшафтах от гидротермических условий среды

Опыт	Поток CO_2	Культура	Уравнения	Переменные	R^2	P	N
КБС	Эмиссия CO_2 из почвы (дыхание почвы)	Ячмень	$X = 0{,}006\ T_5 + 0{,}021$	температура почвы на глубине 5 см (T_5) и 10 см (T_{10})	0,27	0,03	17
		Подсолнечник	$X = 0{,}013\ T_5 - 0{,}112$		0,27	0,04	16
		Картофель (1)	$X = 0{,}010\ T_5 - 0{,}061$		0,31	0,03	16
		Картофель (2)	$X = 0{,}011\ T_{10} - 0{,}064$		0,32	0,02	16
ИФХиБПП РАН	Эмиссия CO_2 из почвы (дыхание почвы)	Севооборот	$X = 0{,}0042$ Тп + $+ 0{,}0013$ Вп $- 0{,}0202$	температура (Тп) и влажность (Вп) почвы	0,31	< 0,001	441
		Пшеница	$X = 0{,}0049$ Тп + $+ 0{,}0014$ Вп $- 0{,}0264$		0,41	< 0,001	320
СамГУ	Нетто-баланс CO_2 (чистый экосистемный обмен)	Полынное пастбище	$X = 0{,}16$ Тв – $- 0{,}40$ Ос $- 1{,}10$	температура воздуха (Тв), количество осадков (Ос)	0,16	< 0,05	583
			$X = 2{,}91 + 0{,}95F_1 + 0{,}65F_2 + 0{,}61F_3$	три фактора ($F_{1\text{-}3}$)	0,13	< 0,05	583

При сравнении эффективности моделирования с помощью DNDC и регрессионных зависимостей отмечено, что имитационная модель более точно и качественно рассчитывает параметры потоков CO_2 в агроландшафтах, что подтверждается высокими корреляциями между наблюдаемыми и расчетными величинами, равенством их средних значений и дисперсий. В опыте КБС (табл. 7) для всех четырех культур коэффициенты Тэйла были ниже 0,30, что говорит о высокой точности воспроизведения моделью дыхания почвы; по результатам однофакторного дисперсионного анализа принималась нулевая гипотеза о равенстве средних, полученных на основе полевых измерений и с помощью моделирования; двухвыборочный тест дисперсий полевых и модельных данных показал их несхожесть для картофеля и пшеницы, но равенство для подсолнечника и ячменя. Для опыта ИФХиБПП РАН (табл. 8) были отмечены положительные критерии Нэша-Сатклиффа, значимые корреляции, а на парующей почве эмиссия CO_2, представленная только микробным дыханием, отражалась имитационной моделью с высокой точностью. В опыте СамГУ (табл. 9) для DNDC двухвыборочный F-тест показал равенство дисперсий расчетных и опытных значений, коэффициент несоответствия Тэйла был значительно ниже, чем для регрессионных зависимостей, а корреляции – выше.

Графический анализ результатов моделирования (рис. 3-4) позволяет увидеть совпадение наблюдаемой и расчетной динамики потоков CO_2 по диапазону значений и чередованию максимумов и минимумов во всех трех опытах. Регрессионные уравнения наилучшим образом отражают величину потоков CO_2 в среднем диапазоне значений. Недостатком модели DNDC является иногда возникающее в летнее время на фоне высоких температур воздуха занижение интенсивности дыхания корней по сравнению с опытными данными, в связи с чем пики эмиссии CO_2 могут недооцениваться. Это связано со встроенной в модель функцией снижения роста растений при превышении оптимального температурного порога, отсутствии осадков в период активного роста и ограниченном содержании азота в почвенном профиле.

Таблица 7. Оценка эффективности моделирования эмиссии CO_2 из почвы в Опыте КБС

Тип моделирования / Параметры		Культуры							
		Подсолнечник		Ячмень		Картофель			Пшеница
		DNDC	регрессия	DNDC	регрессия	DNDC	регрессия 1	регрессия 2	DNDC
Средняя, г С м$^{-2}$ ч$^{-1}$	Опыт	0,146 ± 0,095		0,138 ± 0,068		0,143 ± 0,075		0,173 ± 0,115	
	Модель	0,111 ± 0,072	0,146 ± 0,049	0,160 ± 0,063	0,138 ± 0,036	0,122 ± 0,035	0,143 ± 0,041	0,143 ± 0,043	0,150 ± 0,051
	N	16		17		16		17	
Медиана, г С м$^{-2}$ ч$^{-1}$	Опыт	0,111		0,141		0,134		0,145	
	Модель	0,085	0,161	0,184	0,138	0,140	0,148	0,135	0,154
Коэффициенты эффективности	Нэша	0,256	0,268	0,023	0,132	-0,021	0,306	0,323	0,230
	Тэйла	0,263	0,240	0,202	0,190	0,256	0,196	0,193	0,268
Коэффициенты корреляции	r_p	0,662	0,514	0,533	0,522	0,300	0,553	0,569	0,531
	P	0,005	0,042	0,028	0,031	0,259	0,026	0,022	0,028
Однофакторный дисперсионный анализ	*F*	1,405	0,000	0,975	0,000	1,020	0,000	0,000	0,591
	$F_{крит}$	4,171	4,171	4,149	4,149	4,171	4,171	4,171	4,149
	P	0,245	0,999	0,331	0,999	0,321	0,999	0,999	0,448
Двухвыборочный F-тест для дисперсий	*F*	1,707	3,730	1,186	3,665	4,559	3,270	3,104	4,989
	$F_{крит}$	2,403	2,403	2,333	2,333	2,403	2,403	2,403	2,333
	P	0,156	0,008	0,368	0,006	0,002	0,014	0,018	0,001

Таблица 8. Оценка эффективности моделирования эмиссии CO_2 из почвы в Опыте ИФХиБПП РАН

Показатели		Севооборот		Пшеница		Пар	
		DNDC	регрессия	DNDC	регрессия	DNDC	регрессия
Средняя, г м$^{-2}$ ч$^{-1}$	Опыт	0,046 ± 0,048		0,050 ± 0,048		0,037 ± 0,046	
	N	441		320		121	
	Модель	0,036 ± 0,032	0,046 ± 0,030	0,035 ± 0,031	0,050 ± 0,032	0,040 ± 0,033	0,037 ± 0,009
Коэффициенты эффективности	Нэша	0,290	0,313	0,197	0,411	0,520	0,057
	Тэйла	0,352	0,331	0,374	0,292	0,287	0,434
Коэффициенты корреляции	r_p	0,582	0,560	0,546	0,641	0,723	0,239
	P	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,010
Однофакторный дисперсионный анализ	*F*	13,297	0,000	21,116	0,000	0,211	0,000
	$F_{крит}$	3,852	3,852	3,856	3,856	3,880	3,880
	P	< 0,001	1,000	< 0,001	1,000	0,646	< 0,001
Двухвыборочный F-тест для дисперсий	*F*	2,320	3,190	2,476	2,430	1,913	17,457
	$F_{крит}$	1,170	1,170	1,204	1,201	1,347	1,362
	P	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001

Таблица 9. Оценка эффективности моделирования нетто-баланса CO_2 в Опыте СамГУ

Метод моделирования		Регрессия от метеоусловий	Регрессия от факторов	DNDC
Средняя, г С м$^{-2}$ ч$^{-1}$	Опыт	0,121 ± 0,148 (*N*=583)		
	Модель	0,128 ± 0,058	0,121 ± 0,054	0,128 ± 0,153
Коэффициенты эффективности	Нэша	0,124	0,134	0,108
	Тэйла	0,418	0,425	0,362
Коэффициенты корреляции	r_p	0,357	0,366	0,554
	P	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Однофакторный дисперсионный анализ	*F*	0,913	0,000	0,477
	$F_{крит}$	3,849	3,849	3,849
	P	0,340	< 0,001	0,490
Двухвыборочный F-тест для дисперсий	*F*	7,447	7,447	1,001
	$F_{крит}$	1,146	1,146	1,146
	P	< 0,001	< 0,001	0,493

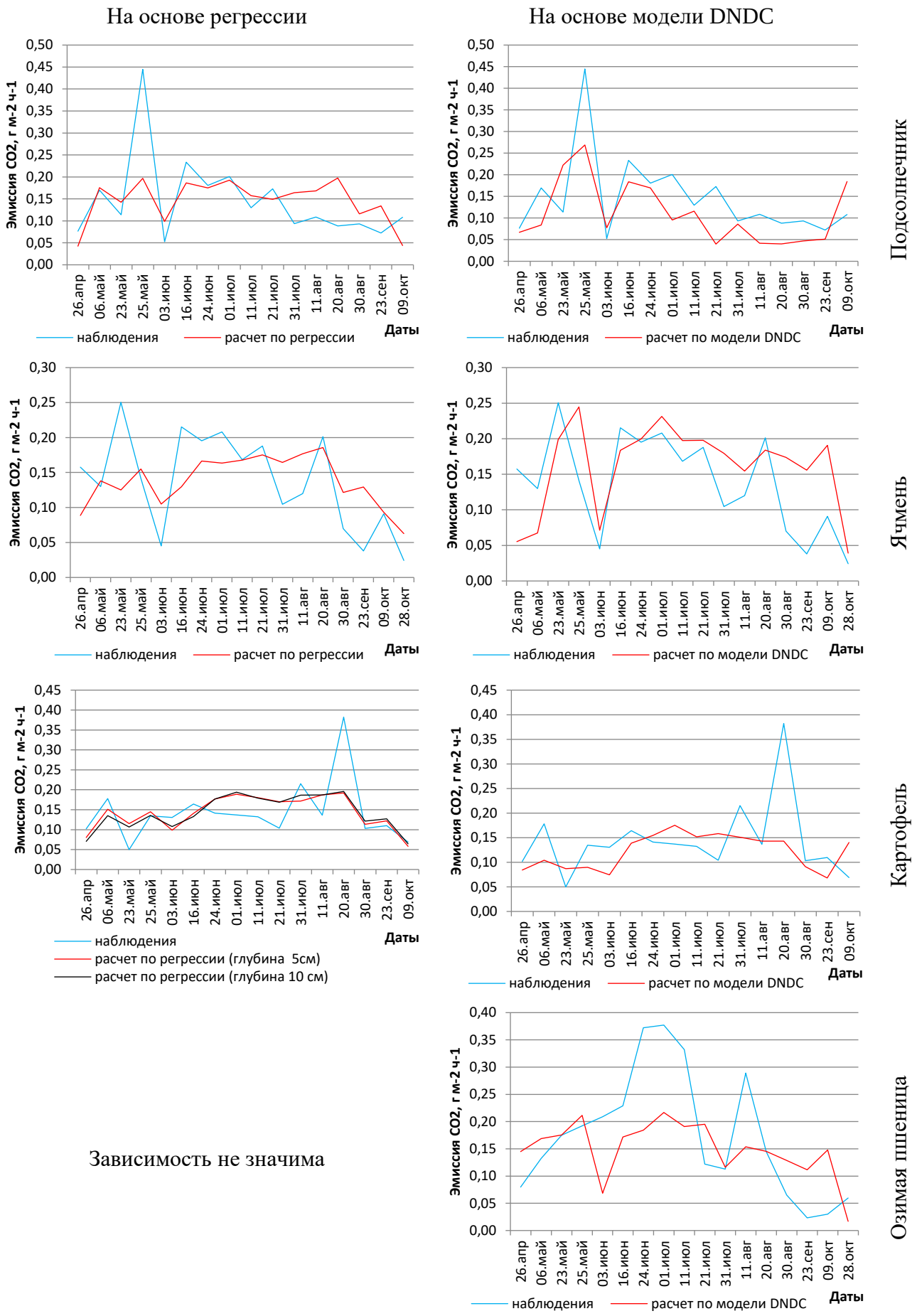


Рисунок 3. Наблюдаемые и рассчитанные значения эмиссии CO_2 из почвы в Опыте КБС в ходе вегетационного сезона 2017 г.

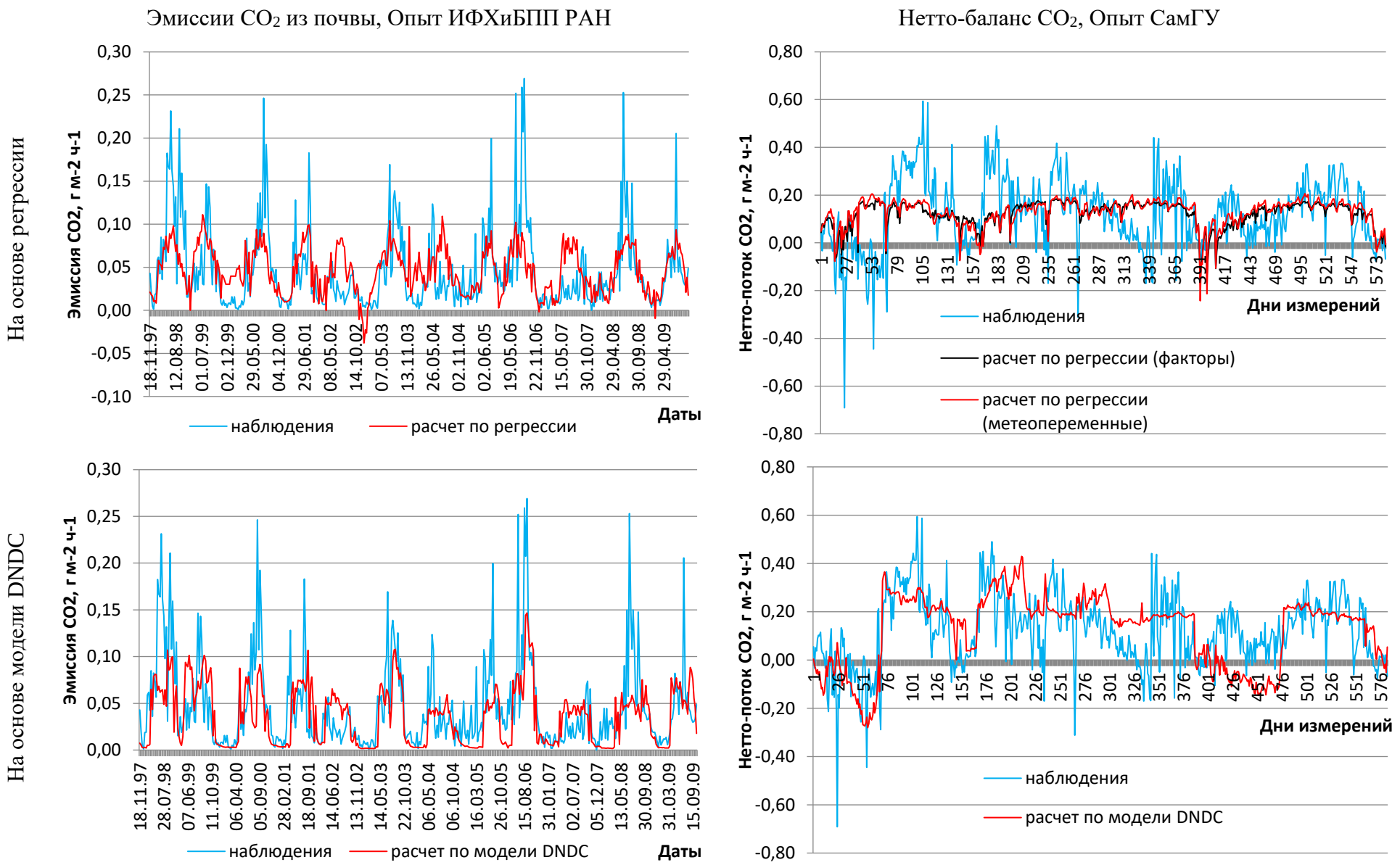


Рисунок 4. Наблюдаемые и рассчитанные значения потоков CO_2 в Опытах ИФХиБПП РАН и СамГУ

Глава 4. Модельные эксперименты по оценке потоков CO_2 в агроландшафтах на основе DNDC

Была разработана методика применения модели DNDC для оценки компонентов биогеохимического цикла углерода в пахотных почвах Европейской территории России, в том числе обоснованы принципы подготовки входной информации для моделирования на основе сведений официальной статистики и информации литературных источников по природным (почвенно-климатические условия) и антропогенным (обработка почвы, внесение удобрений, урожайность) факторам (табл. 10). С целью настройки и адаптации модели для применения на территории региона были скорректированы ее внутренние параметры, включающие характеристики почвенного покрова и биологические особенности культур, разработаны стандартизированные технологии их возделывания (рис. 5).

Модельные эксперименты по оценке влияния внешних условий на формирование потоков CO_2 в агроландшафтах были реализованы на основе принципа последовательного включения антропогенных факторов по мере усложнения их воздействия на почвенные процессы от чистого пара через неудобряемые агроценозы к агроландшафтам интенсивного типа с повышенными дозами удобрений. По результатам работы с моделью определено, что наиболее значимым фактором, определяющим особенности биогеохимического цикла С на Европейской территории России, являются удобрения (рис. 6), при внесении которых интенсивность эмиссии CO_2 из почвы и накопления в ней $C_{орг}$ по сравнению с паровыми участками значительно возрастает.

Эмиссия CO_2 также существенно зависит от природных факторов: складывающихся погодно-климатических условий (рис. 7а), содержания глинистых частиц и $C_{орг}$ в почве (рис. 7б), а также биологических особенностей сельскохозяйственных культур (рис. 7в). При этом требования растений к теплу и влаге не оказывают значимого влияния на результаты моделирования вследствие схожести их у растений одного климатического пояса.

Модель DNDC позволяет связать геохимические процессы в атмосфере, биосфере и почвенном покрове и прогнозирует увеличение абсолютных значений потоков CO_2, в частности дыхания почвы и фотосинтеза, в агроландшафтах в ответ на современное повышение его концентрации в атмосфере. Для неудобряемых серых лесных почв Московской области и выщелоченных черноземов Курской области при использовании удобрений ожидается достижение нулевого баланса почвенного органического углерода через 15-20 лет (рис. 8).

С помощью имитационного моделирования были восстановлены ключевые потоки CO_2 в агроландшафтах Нечерноземья – дыхание почвы, нетто-экосистемный обмен, а также изменение содержания $C_{орг}$ в почве по семилетиям за 1990-2017 гг. (рис. 9), динамика которых совпадает с изменением количества вносимых удобрений и колебаниями урожайности культур. Полученные результаты могут быть экстраполированы на все административные области с учетом

преобладающего типа почвы, набора возделываемых культур и их посевных площадей (рис. 10).

Используемая схема моделирования требует нескольких уточнений в связи с недостатком официальной информации и возникающими на этой основе затруднениями: статистические данные имеют осредненный на основе административно-территориального деления характер; границы почвенных районов не совпадают с границами административных регионов; неизвестно, на каких конкретно типах почвы расположены пахотные земли; неизвестно, на каких конкретно участках и почвах возделываются определенные культуры; неизвестны севообороты, т.е. последовательности смены культур, и доля времени, которое каждая культура занимает в них; неизвестны сорта выращиваемых культур и требования каждого из них к условиям окружающей среды; площади пахотных земель в целом и площади возделывания отдельных культур постоянно изменяются.

Таблица 10. Рекомендуемые источники и методы подготовки данных для моделирования

Блок данных	Источник данных	Методика получения входной информации
Природные факторы		
Климатические условия	ВНИИ ГМИ – МЦД, а также база данных агроклиматических условий Центрального Нечерноземья (Суховеева, 2015)	Пространственное усреднение значений температуры и осадков по региону на основе сетки с разрешением 2,5° широты на 5,0° долготы или усреднение на основе административно-территориального деления (Суховеева, 2016)
Почвенный покров	Единый государственный реестр почвенных ресурсов России (2014)	Выбор преобладающего типа почвы
Антропогенные факторы		
Агротехника сельскохозяйственных культур	Технологические карты, изданные Минсельхозом и профильными научными учреждениями	Прямой перенос данных с желательным уточнением дат и использованных приемов обработки почвы на конкретных участках
Урожайность сельскохозяйственных культур	Федеральная служба государственной статистики	Прямой перенос данных с желательным уточнением продуктивности на конкретных участках
Содержание углерода в растительной биомассе	Распоряжение Минприроды России от 30.06.2017 № 20-р «Об утверждении методических указаний по количественному определению объема поглощения парниковых газов»	Расчет на основе утвержденных коэффициентов
Дозы азотных удобрений	Федеральная служба государственной статистики, Бюллетени «Внесение удобрений под урожай и проведение работ по химической мелиорации земель»	Расчет через отношение общего объема азотных удобрений, внесенных под конкретную культуру в области, и удобренной площади, или через пропорцию путем нахождения доли азотных удобрений от всего объема минеральных: $n_N = \frac{V_N}{S_{\text{мин}}} \approx \frac{V_N * n_{\text{мин}}}{V_{\text{мин}}}$, где n_N – доза азотных удобрений, кг/га; V_N – количество азотных удобрений, тыс. ц; $S_{\text{мин}}$ – площадь, удобренная минеральными удобрениями, тыс. га; $n_{\text{мин}}$ – доза минеральных удобрений, кг/га; $V_{\text{мин}}$ – общее количество минеральных удобрений, тыс. ц (Суховеева, 2018)

Корректировка параметров почвенного покрова, принимаемых в DNDC по умолчанию, для условий России

Показатель	В модели по умолчанию	Исправленное для России	Ссылка
Фракция легкорастворимого гумуса	0,0138	Серые лесные – 0,335, выщелоченные черноземы – 0,30	Ларионова и др., 2011; Люри и др., 2010
Фракция труднорастворимого гумуса	0,9762	Серые лесные – 0,655, выщелоченные черноземы – 0,45	
Соотношение C‡N в $C_{орг}$	10	Дерново-подзолистые иллювиально-железистые – 9, серые лесные – 12	Единый государственный реестр почвенных ресурсов России, 2014
Глубина верхнего слоя почвы, см	20	Дерново-подзолистые преимущественно неглубокоподзолистые – 17, дерново-подзолистые преимущественно мелко и неглубокоподзолистые – 21, серые лесные – 25, выщелоченные черноземы – 29	

Корректировка требований сельскохозяйственных культур к внешним условиям, принимаемых в DNDC по умолчанию, для условий России

Культура	В модели по умолчанию		Исправленное для России (по данным Посыпанов и др., 2007; Шевченко, 2002)	
	Потребность в тепле, °C	Коэффициент водопотребления	Потребность в тепле, °C	Коэффициент водопотребления
Озимая пшеница	1300	200	2000 (1850-2200)	380 (340-420)
Озимая рожь	2000	250	3125 (3000-3300)	345 (270-420)
Ячмень	1300	250	1250 (1000-1500)	375 (300-450)
Овес	1650	250	1250 (1000-1500)	475 (470-480)
Картофель	2100	415	1300 (1000-1600)	625 (600-650)
Подсолнечник	1500	495	2300 (2200-2400)	485 (400-570)

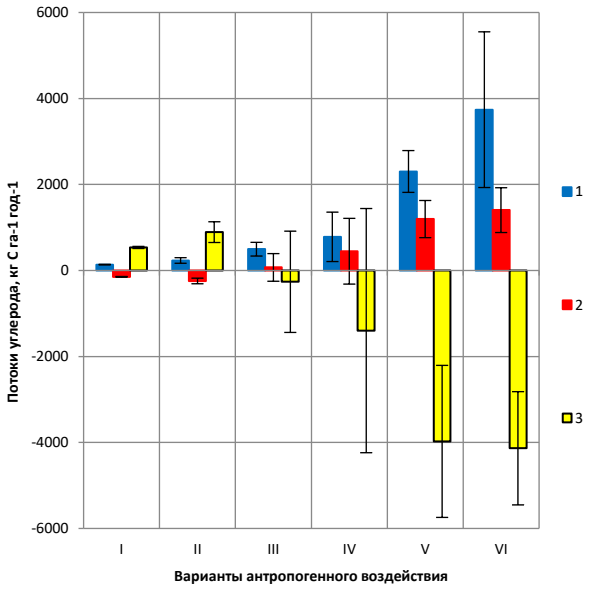
Корректировка соотношения фракций биомассы сельскохозяйственных культур, принимаемых в DNDC по умолчанию, для условий России

Культура	Критерии	Параметры	Зерно	Стебли	Листья	Корни	Ссылка
Озимая пшеница	Фракции биомассы	В модели по умолчанию	0,41	0,21	0,21	0,17	Рассчитанное для России – Левин, 1977; Исправленное для России – Назаренко и др., 2011; Новиков, Кисаров, 2012
		Рассчитанное для России	0,22	0,26	0,26	0,26	
	Соотношение C:N в биомассе	В модели по умолчанию	40	95	95	95	
		Исправленное для России	-	80	80	52	
Ячмень	Фракции биомассы	В модели по умолчанию	0,30	0,23	0,23	0,23	
		Рассчитанное для России	0,26	0,22	0,23	0,29	
	Соотношение C:N в биомассе	В модели по умолчанию	45	75	75	85	
		Исправленное для России	-	80	80	59,5	
Овес	Фракции биомассы	В модели по умолчанию	0,23	0,27	0,27	0,23	
		Рассчитанное для России	0,25	0,24	0,24	0,27	
	Соотношение C:N в биомассе	В модели по умолчанию	35	75	75	85	
		Исправленное для России	-	80	80	59,5	
Озимая рожь	Фракции биомассы	В модели по умолчанию	0,28	0,23	0,23	0,25	
		Рассчитанное для России	0,21	0,27	0,27	0,25	
	Соотношение C:N в биомассе	В модели по умолчанию	20	50	50	50	
		Исправленное для России	-	85	85	-	
Картофель	Фракции биомассы	В модели по умолчанию	0,70	0,13	0,13	0,05	
		Рассчитанное для России	0,78	0,06	0,07	0,09	
	Соотношение C:N в биомассе	В модели по умолчанию	60	60	60	60	
		Исправленное для России	-	-	-	25	

Адаптированная для целей моделирования технология возделывания сельскохозяйственных культур (по данным Грачев, 1980; Евстропов, 2011; Зинченко и др., 2012; Карпов, 2000; Коледа и др., 2010; Типовые технологические карты, 1984)

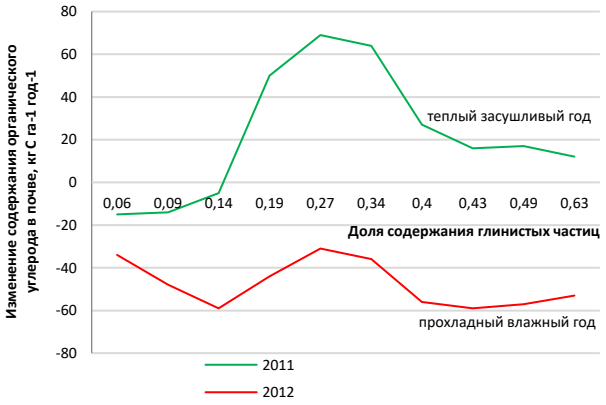
Технологический прием	Картофель			Озимая пшеница		
	Срок выполнения	Глубина обработки, см	Количество удобрений	Срок выполнения	Глубина обработки, см	Количество удобрений
Лущение стерни	III декада июля	6-8		I декада августа	6-8	
Внесение органических удобрений				Через 1 день		100%
Пахота с боронованием и внесением минеральных удобрений				Через 1 день	20-22	50%
Предпосевная культивация				Через 3 дня	12-14	
Посев с внесением минеральных удобрений				II декада августа (на севере раньше, на юге позже)		30%
Внесение органических удобрений и вспашка	III декада августа	20-22	100%			
Внесение минеральных удобрений	Через 7-10 дней		55%			
Ранневесеннее боронование	II декада апреля			I декада апреля		
Внесение минеральных удобрений				Через 1 день		20%
Ранневесенняя культивация	Через 5 дней	5-6				
Перепашка зяби	Через 5 дней	20-22				
Культивация и нарезка гребней с внесением минеральных удобрений	Через 5 дней	12-14	45%			
Посев / посадка	I декада мая (на юге раньше, на севере позже)					
Первое довсходовое рыхление	Через 5 дней	5-6				
Второе довсходовое рыхление	Через 5 дней	5-6				
Послевсходовое рыхление междурядий	I декада июня	12-14				
Окучивание	I декада июля					
Предуборочное рыхление	III декада августа	12-14				
Уборка	I декада сентября (на севере раньше, на юге позже)			III декада августа (на юге раньше, на севере позже)		

Рисунок 5. Адаптация модели DNDC для условий России

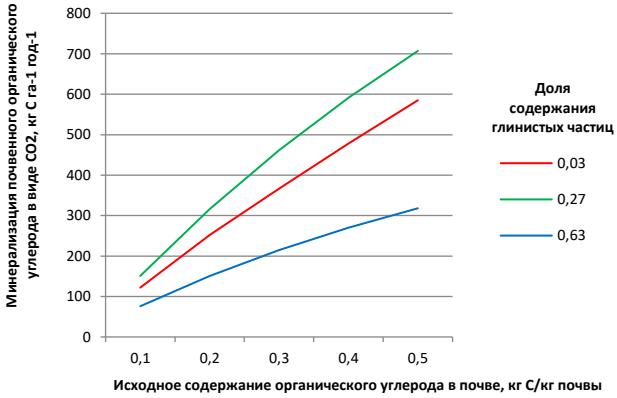


1 – эмиссия CO_2 из почвы за год, кг га$^{-1}$ год$^{-1}$
2 – изменение содержание $C_{орг}$ в почве за год (положительные значения – накопление, отрицательные – потеря), кг га$^{-1}$ год$^{-1}$
3 – совокупный потенциал парниковых газов в пересчете на CO_2-эквивалент за год (положительные значения – эмиссия, отрицательные – депонирование).
Варианты антропогенного воздействия:
I – чистый пар (учитываются метеорологические условия и почвенные характеристики, без антропогенного воздействия);
II – чистый пар с обработкой почвы;
III – озимая пшеница и картофель;
IV – озимая пшеница и картофель с внесением минеральных удобрений;
V – озимая пшеница и картофель с внесением минеральных и органических удобрений,
VI – озимая пшеница и картофель с внесением двойных доз минеральных и органических удобрений

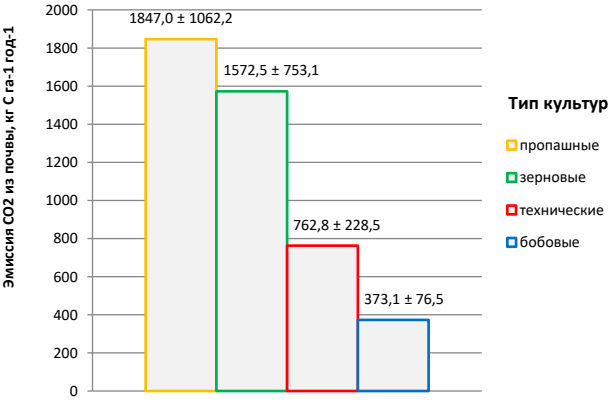
Рисунок 6. Оценка влияния антропогенных факторов на компоненты биогеохимического цикла углерода по данным модели DNDC



а) погодные условия и гранулометрический состав почвы



б) гранулометрический состав почвы и содержание в ней $C_{орг}$



в) биологические особенности культур

Рисунок 7. Оценка влияния природных факторов на компоненты биогеохимического цикла углерода по данным модели DNDC

В Калужской, Московской и Ярославской областях, для которых характерна наиболее стабильная структура посевных площадей, значения дыхания почвы в течение 28 лет последовательно снижаются (рис. 11а), а направление чистого экосистемного обмена меняется от потери CO_2 из агроэкосистем в 1990-е гг. на поглощение в 2000-е гг. (рис. 11б). Значения совокупных потоков CO_2 в регионе уменьшаются вследствие сокращения площадей пахотных

земель. Динамика $C_{орг}$ в почве зависит от набора возделываемых культур, их агротехники и химизации производства (рис. 11в). Так, интенсивные технологии возделывания озимых зерновых и пропашных культур позволяют накапливать его, а под другими культурами вследствие отсутствия внесения органических удобрений почва теряет углерод.

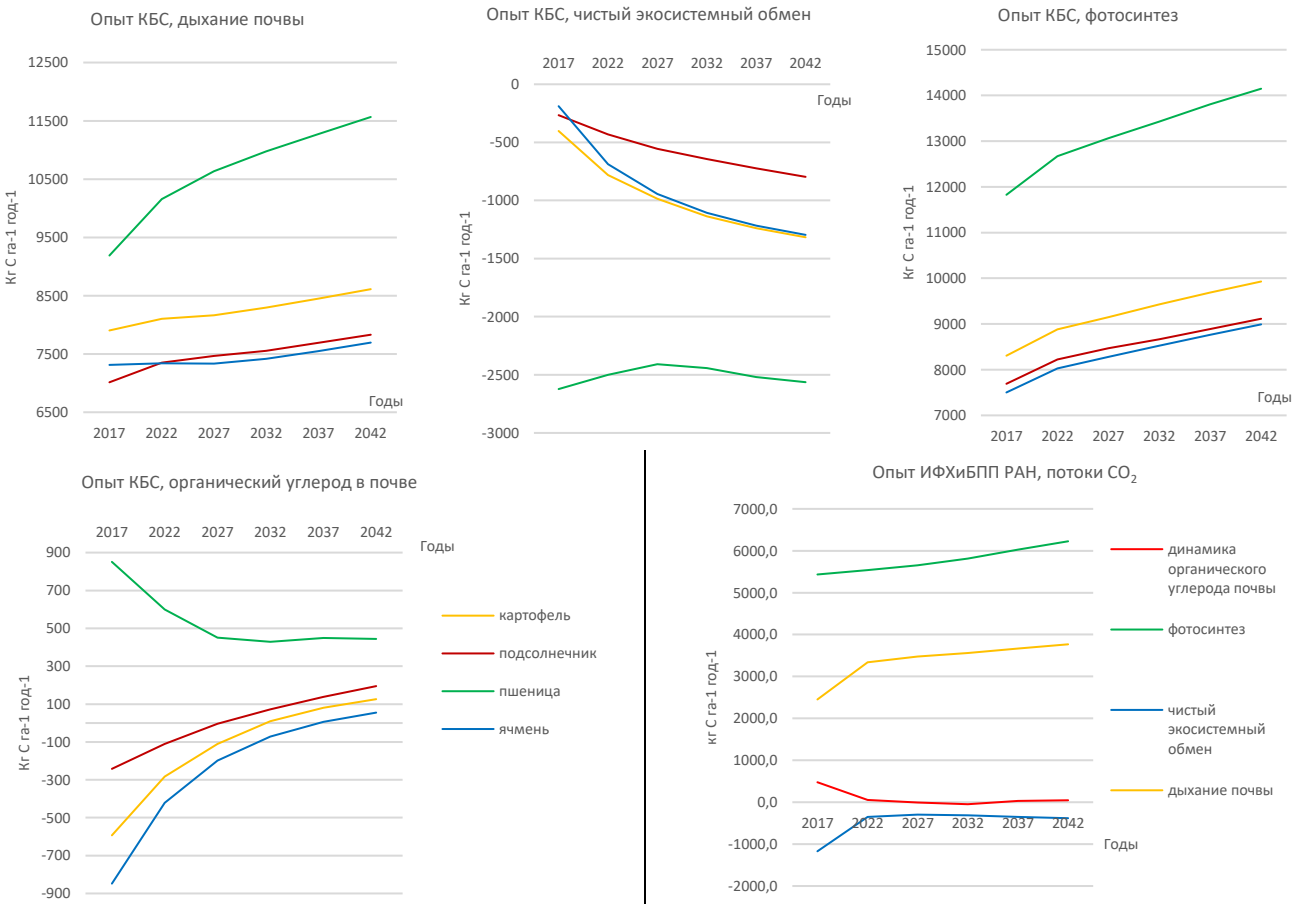


Рисунок 8. Отклик потоков CO_2 в агроландшафтах на повышение его концентрации в атмосфере по результатам моделирования с помощью DNDC

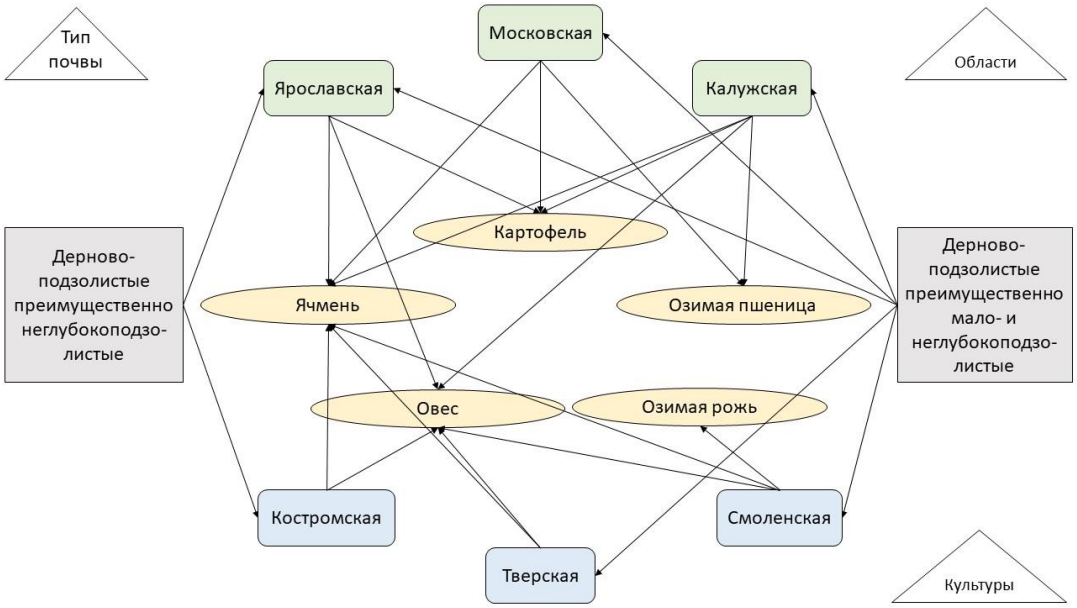


Рисунок 9. Схема моделирования потоков CO_2 в Центральном Нечерноземье

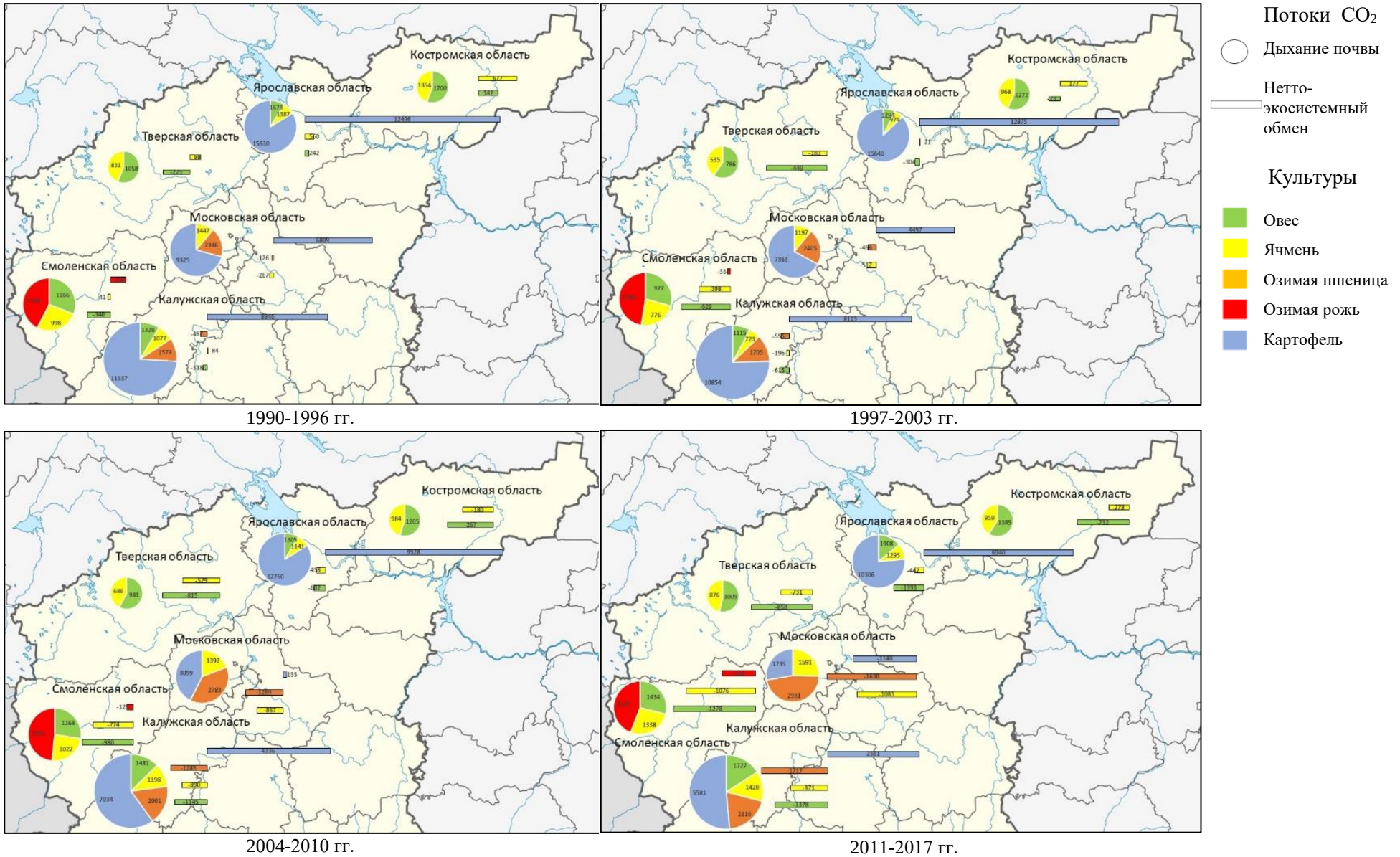
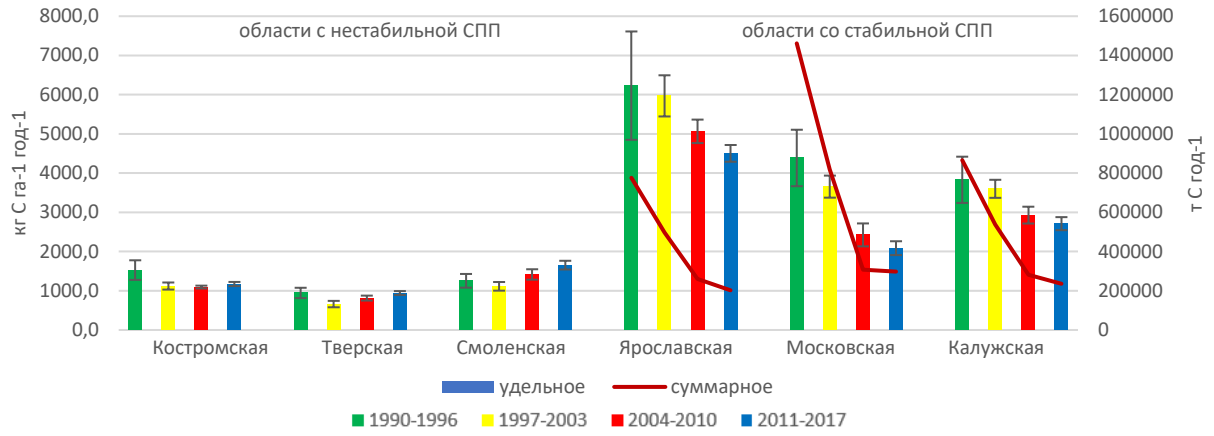
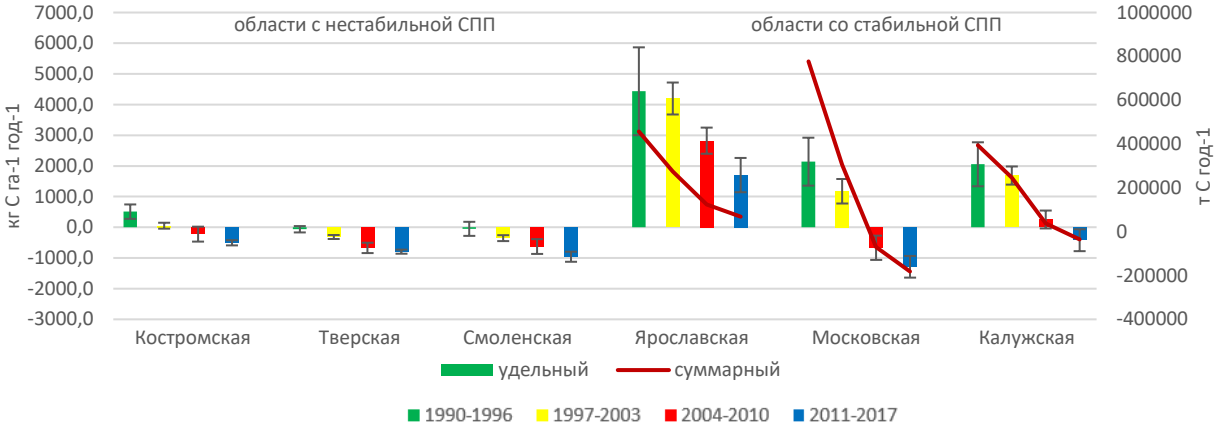


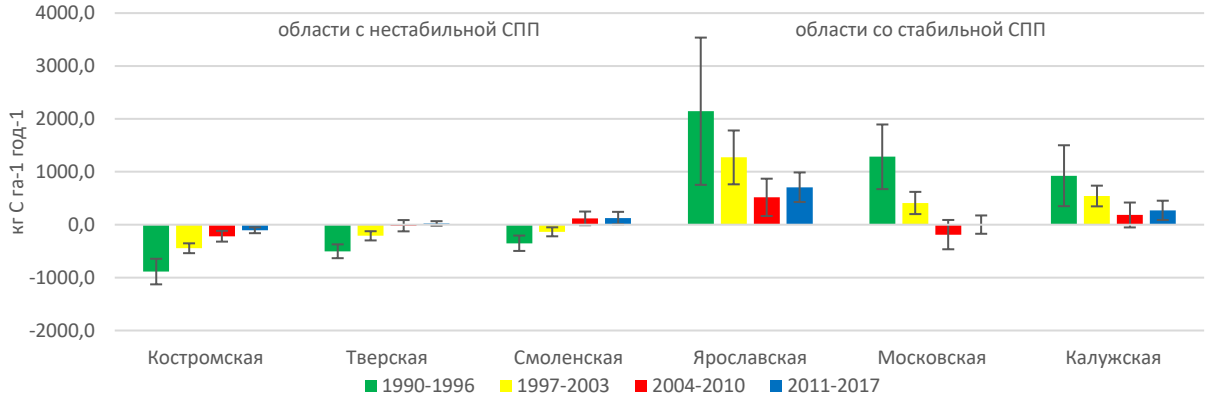
Рисунок 10. Пространственно-временная динамика потоков CO_2 в агроландшафтах Центрального Нечерноземья с разделением по культурам, кг С $га^{-1}$ $год^{-1}$



а)Дыхание почвы



б)Чистый экосистемный обмен



в) Органический углерод в почве

Рисунок 11. Пространственно-временная динамика потоков CO_2 в агроландшафтах Центрального Нечерноземья с разделением по областям

СПП – структура посевных площадей. Удельные значения представлены на основной оси (даны для всех областей), суммарные – на вспомогательной (даны только для областей со стабильной СПП)

Таким образом, на основании характеристик потоков CO_2 рассматриваемые агроландшафты Нечерноземья могут быть разделены на две группы:

- центральная, включающая Московскую, Калужскую и Ярославскую области, – характеризуется стабильной структурой посевных площадей, наличием в севооборотах ключевых товарных культур региона (озимой пшеницы и картофеля), положительным балансом $C_{орг}$ (0...+2000 кг га$^{-1}$ год$^{-1}$) и интенсивным почвенным дыханием (2000-6000 кг га$^{-1}$ год$^{-1}$);

- периферийная, включающая Костромскую, Смоленскую и Тверскую области, – отличается бедным и нестабильным набором возделываемых культур, низкой интенсивностью сельскохозяйственного производства, вследствие чего почва теряет $C_{орг}$ (0…–900 кг га$^{-1}$ год$^{-1}$), а ее дыхание не превышает 2000 кг га$^{-1}$ год$^{-1}$.

ВЫВОДЫ

1. Была разработана методика применения имитационной модели DNDC для условий России, в том числе на базе сведений официальной статистики и информации литературных источников были скорректированы ее внутренние параметры и обоснованы принципы подготовки входной информации. По результатам апробации была подтверждена эффективность этого подхода для оценки составляющих биогеохимического цикла углерода, в частности потоков CO_2 в агроландшафтах Европейской территории страны.

2. DNDC более точно и качественно рассчитывает параметры дыхания почвы и нетто-экосистемного обмена по сравнению с регрессионными моделями, ее выходные данные совпадают с результатами полевых измерений. Недостатком модели является занижение интенсивности дыхания корней в летнее время, в связи с чем пики эмиссии CO_2 могут недооцениваться.

3. По оценкам на основе модели DNDC, абсолютные значения потоков CO_2 в агроландшафтах будут увеличиваться пропорционально повышению его концентрации в атмосфере, приводя к возможному достижению нулевого баланса $C_{орг}$ в пахотных почвах Европейской территории России.

4. По данным моделирования, агроландшафты Центрального Нечерноземья в течение вегетационного сезона выступают как поглотители CO_2 из атмосферы. На основе географического положения и антропогенного воздействия их можно разделить на две группы: центральная с интенсивным хозяйствованием и стабильной структурой посевных площадей, для которой характерно накопление $C_{орг}$ в почве и значительное ее дыхание, и периферийная, отличающаяся потерей $C_{орг}$ из почвы и низкой интенсивностью дыхания.

5. Для потоков CO_2 в агроландшафтах отмечаются средние прямые корреляции с температурой и слабые обратные – с влажностными характеристиками среды. Согласно результатам регрессионного анализа, преимущественное влияние на биогеохимический цикл углерода в агроландшафтах оказывает антропогенный фактор, тогда как погодно-климатические условия объясняют около трети дисперсии эмиссии CO_2 из почвы и не более 1/6 баланса CO_2 в экосистеме. По итогам имитационного моделирования определено, что ключевым антропогенным фактором формирования динамики потоков CO_2 являются вносимые удобрения.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из перечня ВАК

1. Суховеева О.Э. Верификация модели DNDC для оценки параметров углеродного и азотного обмена в пахотных почвах Нечерноземья // Известия РАН. Серия географическая. – 2018. – № 4. – С. 89-95.
2. Суховеева О.Э. Приложение модели DNDC к оценке параметров углеродного и азотного обмена в пахотных почвах Нечерноземья // Известия РАН. Серия географическая. – 2018. – № 2. – С. 74-85.
3. Суховеева О.Э., Насыров М.Г. Оценка влияния метеорологических условий на баланс углекислого газа в полупустынях Узбекистана // Географический вестник. – 2018. – № 1. – С. 95-105.
4. Суховеева О.Э., Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Сапронов Д.В. Оценка дыхания агросерой лесной почвы с использованием методов статистического и имитационного моделирования // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. – 2018. – Т. 4 (70). – № 1. – С. 151-158.
5. Суховеева О.Э. Изменения климатических условий и агроклиматических ресурсов в Центральном районе Нечерноземной зоны // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. – 2016. – № 4. – С. 41-49.

Статьи в рецензируемых журналах из базы РИНЦ

6. Суховеева О.Э. Моделирование потоков парниковых газов и циклов азота и углерода в почвах (обзор) // Журнал естественнонаучных исследований. – 2017. – Т. 2. – № 4. – С. 61-76.
7. Суховеева О.Э. Модель DNDC в оценке потоков парниковых газов и баланса углерода и азота в пахотных почвах Московской области // Математика, информатика, естествознание в экономике и общества (МИЕСЭКО-2016). Труды всероссийской научной конференции. Т. II/ отв. ред. Байков А.Ю. – М.: МФЮА, 2016. – С. 5-12.
8. Sukhoveeva O. DNDC modelling of carbon and nitrogen balance in croplands of Moscow region // Агробизнес и экология. – 2015. – Т. 2. – № 2. – С. 226-228.

Тезисы конференций

9. Суховеева О.Э. Моделирование потоков азота и углерода в агроэкосистемах Московской области на основе модели DNDC // Вклад молодых ученых в инновационное развитие АПК России: сборник статей Международной научно-практической конференции молодых ученых. Том I / Пензенская ГСХА. – Пенза: РИО ПГСХА, 2015. – С. 14-16.
10. Суховеева О.Э. Оценка динамики органического углерода в пахотных почвах Московской области на основе модели DNDC // Сборник Тезисов 4-й Всероссийской Интернет-конференции «Грани науки 2015» / Отв. ред. А.В. Герасимов. – Казань.: Изд-во КФУ, 2015. – С. 164-165.
11. Sukhoveeva O. Changes of agroclimatic conditions in the Central Non-Black Soil Zone // International Geographical Union Regional Conference «Geography, culture and society for our future Earth». – M.: IGU, 2015. – C. 1307.
12. Sukhoveeva O. Estimation of soil organic carbon in croplands of Moscow region by using the DNDC model // Abstracts. 5th International symposium on soil organic matter, 20-24 September 2015. – Gottingen, Germany, 2015. – P. 320.
13. Суховеева О.Э. Использование модели DNDC для оценки биогеохимических циклов азота и углерода в агроэкосистемах Центрального Нечерноземья // Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2016». Секция География / Отв. ред. И.А. Алешковский, А.В. Андриянов, Е.А. Антипов. — М.: МАКС Пресс, 2016. – URL: https://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2016/data/8344/uid17763_report.pdf.

14. Суховеева О.Э. Использование модели DNDC для оценки эмиссии парниковых газов в пахотных почвах России // Материалы Научных чтений по экологическому моделированию памяти профессора А.С. Комарова. – URL: http://www.ecomodelling.ru/conferences/memorials2016.

15. Суховеева О.Э. К вопросу оценки динамики органического углерода в пахотных почвах Центрального Нечерноземья на основе модели DNDC // Материалы Международной научной конференции XIX Докучаевские молодежные чтения «Почва – зеркало ландшафта» / Под ред. Б.Ф. Апарина. – СПб.: Издательский дом С.-Петербургского государственного университета, 2016. – С. 237-238.

16. Суховеева О.Э. Моделирование биогеохимического цикла углерода в агроэкосистемах Центрального Нечерноземья // Тезисы докладов Всероссийской научной конференции «Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Основные результаты и пути развития». Москва, 20-22 марта 2017 г. / Отв. сост. А.А. Трунов, П.Д. Полумиева, А.А. Романовская. — М.: ФГБУ «ИГКЭ Росгидромета и РАН», 2017. — С. 148-149.

17. Суховеева О.Э. Моделирование дыхания серой лесной почвы агроценоза // Тезисы докладов XXIV Международной научно конференции студентов аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2017». Серия Почвоведение / Отв. ред. И.А. Алешковский, А.В. Андриянов, Е.А. Антипов. – М.: МАКС Пресс, 2017. – С. 50-51.

18. Суховеева О.Э. Оценка эмиссии парниковых газов из нечерноземных пахотных почв с помощью модели DNDC // Материалы Международной научной конференции XX Докучаевские молодежные чтения «Почва и устойчивое развитие государства» / Под ред. Б.Ф. Апарина. – СПб., 2017. – С. 90-92.

19. Суховеева О.Э., Насыров М.Г. Оценка баланса углекислого газа в полупустынях Узбекистана // Современная экология: образование, наука, практика. Материалы международной научно-практической конференции (г. Воронеж, 4-6 октября 2017 г.) / Под общ. ред. проф. В.И. Федотова и проф. С.А. Куролапа. – Воронеж: Издательство «Научная книга», 2017. – Т. 1. – С. 347-350.

20. Суховеева О.Э., Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Сапронов Д.В. Моделирование потоков углерода в агроэкосистемах // Математическое моделирование в экологии. Материалы Пятой Национальной научной конференции с международным участием, 16–20 октября 2017 г. – Пущино, ИФХиБПП РАН, 2017. – С. 208-211.

21. Sukhoveeva O. The flows of soil organic matter in arable soils in Central Russia // Abstracts. 6th International symposium on soil organic matter, 3-7 September 2017. – Harpenden, United Kingdom, 2017 – P. 312.

22. Sukhoveeva O., Nasirov M. Net ecosystem exchange in Uzbekistan semideserts // Practical Geography and XXI Century Challenges. International Scientific and Practical Conference, 4-6 June 2018, Moscow. Conference Book. Part 1. – Moscow: Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, 2018. – P. 668.

23. Sukhoveeva O., Karelin D., Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Sapronov D. Simulation modelling carbon dioxide emission from arable soils in European Russia // Practical Geography and XXI Century Challenges. International Scientific and Practical Conference, 4-6 June 2018, Moscow. Conference Book. Part 2. – Moscow: Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, 2018. – P. 220-221.

24. Sukhoveeva O.E., Karelin D.V. Modelling soil respiration and net ecosystem exchange in agrolandscapes //Abstract. 21st World congress of soil science, 12-17 August 2018. – Rio de Janeiro, Brazil, 2018. – URL: http://www.21wcss.org/inc/abstract.php.

База данных

25. Суховеева О.Э. Агроклиматические ресурсы Центрального Нечерноземья. База данных № 2015620703 от 29.04.2015 г.